

ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНТРОЛЯ АММИАЧНОГО ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА I КОНТУРА ЛЕГКОВОДНЫХ РЕАКТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

© 2025 г. **А. И. Горшков^a**, А. А. Змитродан^a, С. Н. Орлов^{a, b}, Ю. В. Цапко^{a, b, *}

^a Научно-исследовательский технологический институт им. А.П. Александрова,
Копорское шоссе, д. 72, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл., 188540 Россия

^b Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Политехническая ул., д. 29, Санкт-Петербург, 194214 Россия

*e-mail: yura2823@mail.ru

Поступила в редакцию 14.10.2024 г.

После доработки 16.01.2025 г.

Принята к публикации 29.01.2025 г.

Представлены результаты исследования процессов, происходящих в теплоносителе I контура легководного реактора транспортного назначения типа КЛТ-40С при ведении в нем аммиачного водно-химического режима (ВХР). На начальном этапе кампании в теплоносителе отмечалась высокая концентрация ацетат-ионов (200–220 мкг/кг) и их содержание оказалось превалирующим среди других анионных примесей. При работе реактора их концентрация в теплоносителе снижалась вследствие радиолизных и термоокислительных процессов. Другие анионы, в том числе вызывающие локальную коррозию конструкционных материалов (хлорид- и сульфат-ионы), в теплоносителе как работающего, так и остановленного реактора присутствовали в небольших количествах — не более 15 мкг/кг. Полученные результаты исследования поведения анионных примесей в теплоносителе I контура указывают на возможность долговременной работы ядерной энергетической установки (ЯЭУ) без подключения ионообменных фильтров очистки, действие которых в нормальных режимах эксплуатации может вызывать загрязнение технологических сред продуктами собственной деструкции. Исходя из опыта эксплуатации легководных реакторов транспортного назначения предложены пути совершенствования водно-химического режима I контура для атомных электростанций малой мощности (АСММ), в частности рекомендовано поддерживать нормируемые концентрации реперных анионов в теплоносителе остановленного реактора, а также на диагностическом уровне параметры теплоносителя в процессе расхолаживания. Предложено в качестве нормируемых показателей теплоносителя I контура АСММ принять концентрации хлорид- и сульфат-ионов для остановленного реактора равными 50 мкг/кг, в качестве диагностических показателей при расхолаживании реактора — концентрации хлорид- и сульфат-ионов 100 и 200 мкг/кг соответственно.

Ключевые слова: транспортная ядерная энергетическая установка, аммиачный водно-химический режим, совершенствование ВХР, ионообменные фильтры, исследование водного теплоносителя

DOI: 10.56304/S0040363625700936

При работе легководного ядерного реактора на мощности давление в I контуре составляет 15.5–17.2 МПа, температура теплоносителя — 270–330°C [1]. В таких условиях большинство анионных примесей в теплоносителе становятся весьма коррозионно-агрессивными. Хлорид-ионы и в меньшей степени сульфат-ионы способны вызывать питтинговую коррозию [2] и растрескивание под напряжением конструкционных материалов I контура [3]. Межкристаллитную коррозию также провоцируют и серосодержащие соединения [1]. В работе [4] отмечено, что коррозионная агрессивность сульфатов и хлори-

дов по отношению к аустенитным реакторным сталям при совместном их присутствии выше, чем по отдельности. В связи с этим в теплоносителе I контура необходимо поддерживать минимально возможное содержание анионных примесей.

В [5] приводятся следующие предельные содержания анионов в теплоносителе I контура, мкг/кг, не более: хлоридов — 200 для реакторов типа PWR (стандарт VGB Германия), сульфатов — 100 (стандарт EPRI США), хлоридов — 100 для реакторов типа ВВЭР 440/1000 (стандарты России и Финляндии).

Полностью удалить коррозионно-агрессивные анионные примеси из теплоносителя I контура на практике невозможно. Это связано с поступлением сульфат-ионов в теплоноситель вследствие радиационно-термического разложения продуктов деструкции ионитов в фильтрах системы очистки [6, 7]. Также сульфаты и хлориды поступают в контур с реагентами [5], дозируемыми для поддержания водно-химического режима. Нитраты и нитриты образуются в результате окислительно-восстановительных процессов с участием азота, присутствующего в аммиаке и гидразине, и растворенного молекулярного азота. Органические примеси могут попадать в теплоноситель I контура с водой первичного заполнения и подпиточной водой, при дозировании корректирующих добавок, при выносе из фильтров технологических примесей ионитов и продуктов их деструкции [8]. Таким образом, состав и содержание анионных примесей в теплоносителе зависят от технологических факторов, а также радиационно-химических процессов.

Цели настоящей работы – обобщить результаты определения состава ионных примесей и выявить закономерности их поведения в теплоносителе I контура транспортной ЯЭУ типа КЛТ-40С. Такой ядерный реактор применяется на российских ледоколах и плавучем энергоблоке “Академик Ломоносов” и в настоящее время является основой проектируемых в России атомных электростанций малой мощности. Результаты проведенных исследований физико-химических процессов в водном теплоносителе с учетом корректирующих добавок и примесей, представленные в данной работе, могут быть использованы при разработке решений по нормированию ВХР I контура АСММ и способам его поддержания.

МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Объем исследования

Экспериментальные данные получены при эксплуатации транспортной ЯЭУ типа КЛТ-40С. Проанализированы семь периодов работы установки на мощности и три периода стояночных режимов (табл. 1). Приведены результаты анализа проб теплоносителя, отобранных при стационарной мощности реактора 30% номинальной и очистке теплоносителя на ионообменных фильтрах I контура, а также изменения концентрации анионных примесей в теплоносителе на примере переходных режимов в четвертом периоде и после седьмого периода эксплуатации.

Отбор проб проводился в изокINETических условиях (при сопоставимой линейной скорости теплоносителя в контуре и пробоотборной ли-

Таблица 1. Продолжительность периодов эксплуатации и остановов транспортной ЯЭУ типа КЛТ-40С

Период эксплуатации	Продолжительность, сут	
	периода	останова
1	348	—
1о	—	38
2	108	—
2о	—	89
3	106	—
4	124	—
5	107	—
6	106	—
6о	—	42
7	107	—

Примечание. 1о, 2о, 6о — останов после периода эксплуатации (стояночный режим).

нии). Перед отбором проб пробоотборные линии промывались теплоносителем (трехкратным объемом).

Водно-химический режим I контура

В I контуре установки поддерживался аммиачный водно-химический режим, нормируемые показатели которого приведены в табл. 2 [9]. В соответствии с нормами качества теплоносителя из анионных компонентов нормируется только содержание хлорид-ионов, которое не должно превышать 50 мкг/кг.

Значение рН в пробах теплоносителя при температуре 25°C находилось в диапазоне 9.9–10.4 (в среднем 10.2). При 300°C значение рН рассчитывали по алгоритму, приведенному в работах [10, 11]. В рассматриваемый период работы реактора оно составляло 6.5–7.2.

Электрохимический коррозионный потенциал теплоносителя, выраженный относительно стандартного водородного потенциала (SHE), вычисляли по алгоритму, приведенному в рабо-

Таблица 2. Нормируемые показатели качества теплоносителя в I контуре ЯЭУ при аммиачном ВХР

Показатель	Эксплуатационный режим	
	работа	останов
pH ₂₅	9.0–10.5	
Концентрация, мг/кг:		
аммиака	10–100	
хлорид-ионов	0.05	
кислорода	Не нормируется	0.02

тах [12, 13]. Значение его при концентрации аммиака от 10 до 100 мг/кг при температуре 300°C находилось в диапазоне от -0.68 до $-0.82 V_{SHE}$, на остановленном реакторе – от -0.62 до $-0.70 V_{SHE}$.

Методы исследования

Концентрацию газообразных продуктов в теплоносителе определяли методом газовой хроматографии с помощью прибора “Кристалл-2000М” после их выделения из водных проб в газовую фазу при снижении давления и температуры пробы в равновесных условиях. Содержание углеводородов (метан) в газовой фазе составляло 0.007–3.30 мг/дм³, погрешность измерений – 22%.

Концентрацию аммиака в теплоносителе определяли методом фотометрии на фотоколориметре КФК-3-01-3ОМЗ в диапазоне 0.125–100.0 мг/дм³ при погрешности измерений 22%.

Измерение pH проводили с помощью иономера “Анион-4154” в диапазоне pH = 7–12 при погрешности измерений 0.1.

Концентрацию анионов определяли на ионном хроматографе “Стайер-А” при соблюдении следующих условий: колонка Transginomic AN-2 (250 × 4.6 мм), элюент – раствор NaOH концентрацией 15 ммоль/дм³, расход элюента 1.2 мл/мин, температура термостата ячейки кондуктометрического детектора 30°C. Диапазон измерений составлял 2–500 мкг/дм³ при погрешности измерений не более 35%.

Содержание общего органического углерода определяли с помощью анализатора Shimadzu TOC-V_{wp} при соблюдении следующих условий: объем пробы 3 см³, объем окислителя (смешанный раствор H₃PO₄ + Na₂S₂O₈) 0.5 см³, подкисление фосфорной кислотой H₃PO₄ 3% (объема пробы), расход газа-носителя (N₂) 200 мл/мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Анионный состав теплоносителя I контура

На рис. 1 представлена информация по присутствию анионных компонентов в теплоносителе I контура при работе реактора на стационарной мощности и на остановленном реакторе. Из данных, приведенных на рисунке, следует, что и на остановленном, и на работающем реакторе концентрация ацетат-ионов, определяемая как сумма анионов низших карбоновых кислот, значительно превышала концентрацию других анионов. Также в заметном количестве в теплоносителе присутствовали хлорид-ионы, нитрат- и нитрит-ионы и сульфат-ионы.

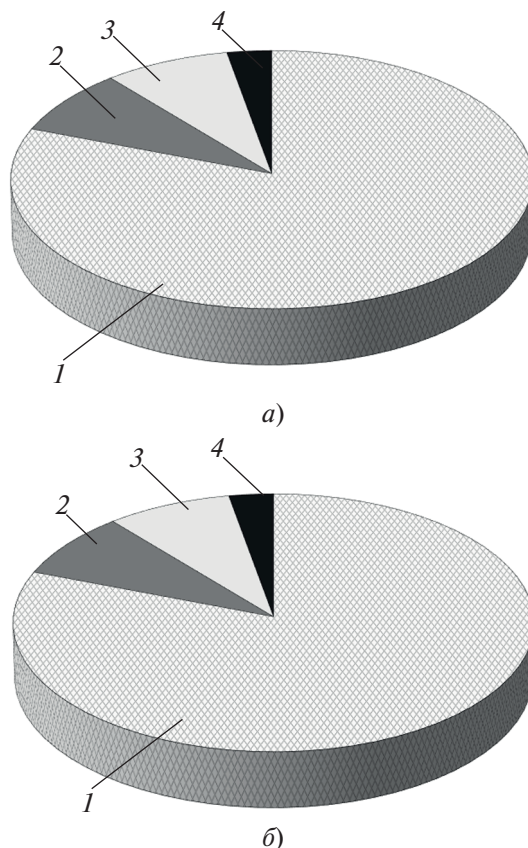


Рис. 1. Анионный состав теплоносителя при работе реактора на стационарной мощности (а) и на остановленном реакторе (б). 1 – ацетат-ионы; 2 – хлорид-ионы; 3 – нитрат- и нитрит-ионы; 4 – сульфат-ионы

Ацетат-ионы

На рис. 2 представлены данные по концентрации ацетат-анионов в теплоносителе I контура при эксплуатации ЯЭУ. Видно, что содержание ацетат-анионов было максимальным в первом периоде эксплуатации реактора и затем довольно быстро снижалось. Концентрация ацетат-анионов на остановленном реакторе была заметно ниже, чем в периоды работы на мощности.

Изменение концентрации органических соединений в теплоносителе I контура при эксплуатации реактора показано на рис. 3. Из данных, приведенных на рисунке, следует, что органический углерод находился в теплоносителе преимущественно в форме метана. Доля углерода в форме ацетат-ионов составляла 3–5% (по массе), в форме сложных углеводородов (с числом атомов углерода от 2 до 4) – от 8 до 15% (по массе). В периоды эксплуатации 6, 7 концентрацию сложных углеводородов в теплоносителе не измеряли. Содержание органических соединений снижалось, что объясняется постепенным удалением их летучих форм при переходе в газовую среду и радиа-

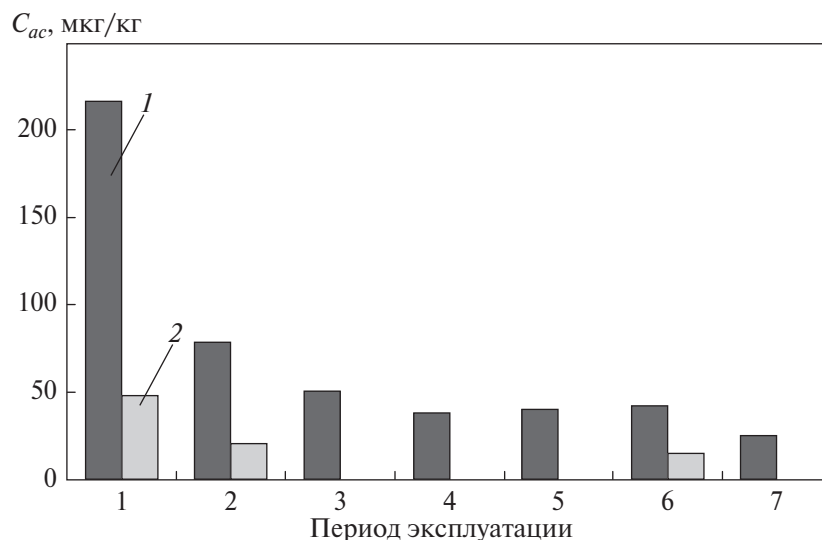


Рис. 2. Среднее значение концентрации ацетат-ионов C_{ac} (ac — от англ. acetate) в теплоносителе I контура при работе реактора на стационарной мощности (1) и на остановленном реакторе (2)

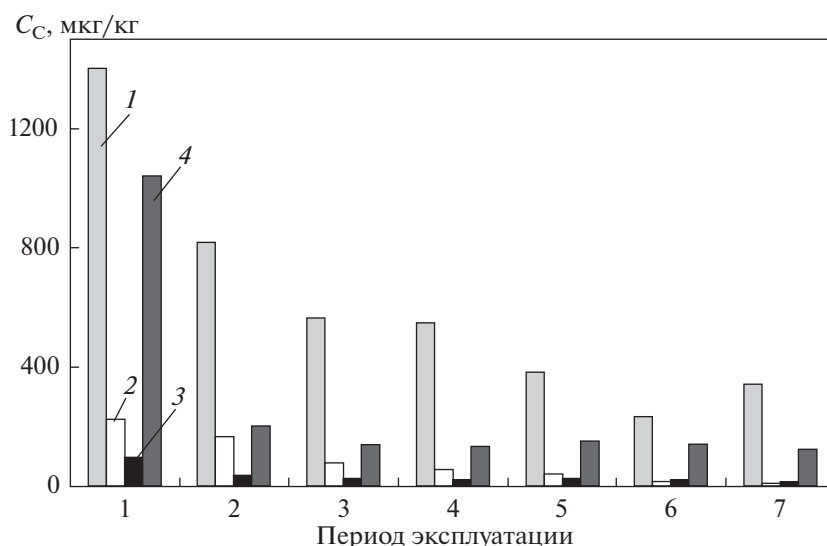


Рис. 3. Содержание углерода C_c в форме органических соединений в теплоносителе I контура. 1 — метан; 2 — сложные углеводороды; 3 — ацетат-ионы; 4 — ООУ

ционно-термическими превращениями в неорганические формы с осаждением на ионообменных фильтрах очистки теплоносителя.

Содержание общего органического углерода (ООУ) в исследованные периоды работы реакторной установки колебалось незначительно. В процессе эксплуатации вследствие радиационно-термического воздействия на органические примеси отмечалось постепенное снижение концентрации ООУ от 1300 до 150 мкг/кг, т.е. до значения, достигаемого при очистке водных сред методом ионного обмена [14]. При этом, как это следует из данных рис. 3, доля ионных

примесей органической природы в водной фазе, определяемых как ацетат-ионы, относительно ООУ среди нелетучих органических соединений была небольшой.

Азотсодержащие анионы

На рис. 4 представлены данные по концентрациям нитрат- и нитрит-ионов в теплоносителе I контура при эксплуатации ЯЭУ, которые находились в диапазоне 3–16 мкг/кг. Зависимости концентрации этих анионов от продолжительности

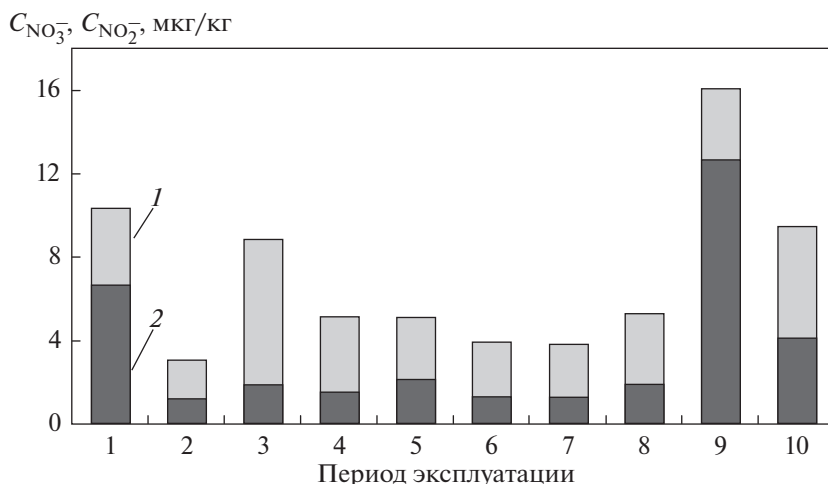


Рис. 4. Среднее значение концентрации нитрат-ионов $C_{\text{NO}_3^-}$ (1) и нитрит-ионов $C_{\text{NO}_2^-}$ (2) в теплоносителе I контура при эксплуатации реактора

сти эксплуатации или режима работы реактора не наблюдалось.

В табл. 3 представлена доля азота в азотсодержащих соединениях в теплоносителе I контура. Как следует из данных таблицы, азот в теплоносителе преимущественно находился в молекулярной форме (примерно 98%). Доля азота, присутствовавшего в теплоносителе в форме аммиака, составляла 1.6–2.2%, доля окисленных форм азота (нитрит- и нитрат-ионов) не превышала $2.1 \times 10^{-4}\%$.

Сульфат- и хлорид-ионы

Содержание сульфат-ионов в теплоносителе работающего реактора составляло 2–3 мкг/кг. В большинстве проб, отобранных в стояночном режиме, концентрация сульфатов находилась на таком же уровне, однако в отдельных пробах она

возрастала до 20–30 мкг/кг. Как правило, это наблюдалось после подключения ионообменных фильтров. Данный факт объясняется главным образом тем, что после останова реактора в ионообменных фильтрах очистки в системе теплоноситель — ионит восстанавливается ионообменное равновесие, что оказывается особенно заметным для сульфат-ионов (основного продукта деструкции сульфокислотного катионита). Этот эффект также усиливается при дозировании аммиака или гидразина в контур перед пуском реактора вследствие повышения щелочности среды и усиления элюирующей способности теплоносителя.

Изменение концентрации хлорид-ионов в теплоносителе I контура при эксплуатации ЯЭУ показано на рис. 5. Как видно на рисунке, концентрация хлорид-ионов составляла 4–10 мкг/кг, что в 5–12 раз ниже допустимого (нормируемого) значения. Как и в случае с азотсодержащими анионами, заметных изменений концентрации хлорид-ионов в теплоносителе в зависимости от продолжительности эксплуатации или режима работы реактора не наблюдалось.

Концентрация анионов в теплоносителе в переходных режимах

На рис. 6 представлено изменение концентрации анионов в теплоносителе I контура во время работы реактора на мощности N и при его остановах. На рисунке видно, что после полного останова реактора и начала его расхолаживания концентрация анионов возрастала в 2–3 раза, затем снижалась до исходного значения благодаря очистке теплоносителя на ионообменных фильтрах.

Таблица 3. Доля азота, % (по массе), в форме аммиака, нитрат- и нитрит-ионов в теплоносителе I контура

Период эксплуатации	Форма азотсодержащего соединения	
	аммиак	$\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$
1	2.2	2.1×10^{-4}
2	1.8	1.1×10^{-4}
3	1.9	8.2×10^{-5}
4	1.7	4.5×10^{-5}
5	1.8	4.7×10^{-5}
6	1.6	6.2×10^{-5}
7	1.7	1.2×10^{-4}

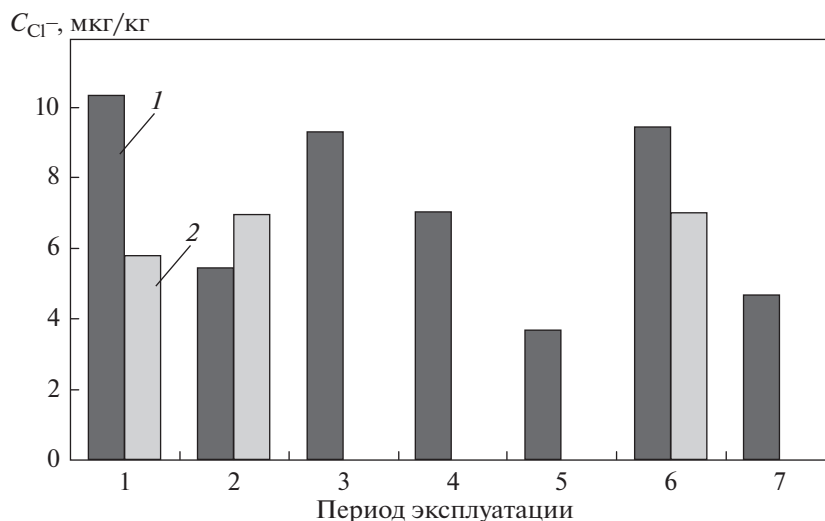


Рис. 5. Среднее значение концентрации хлорид-ионов C_{Cl^-} в теплоносителе I контура при стационарной работе (1) и на остановленном реакторе (2)

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Высокая концентрация ацетат-анионов и других органических соединений в теплоносителе I контура транспортной ЯЭУ объясняется остаточным загрязнением после предыдущих циклов работы, в одном из которых произошло поступление ионообменной смолы из фильтров в объем контура. Аналогичная картина наблюдалась в теплоносителе I контура АЭС Jaslovske Bohunice V1 после попадания в него ионообменной смолы из фильтров [15]. После пуска реактора в следующем цикле эксплуатации концентрация сульфат-ионов достигала 500, ацетат-ионов — 510, метана — 800 мкг/кг. Спустя два месяца эксплуатации концентрация сульфат-ионов снизилась до 1, ацетат-ионов — до 100, метана — до 450 мкг/кг. В I контуре рассматриваемой транспортной ЯЭУ концентрация органических соединений также уменьшалась с ростом длительности эксплуатации реактора, пока не достигла постоянных значений: 25–40 мкг/кг по ацетатам и сложным углеводородам, 300–400 мкг/кг по метану. Следует отметить, что снизились не только концентрации ацетат-ионов и сложных углеводов в теплоносителе, но и их доли в общем содержании органических форм углерода.

В работе [16] приведены диаграммы Пурбе основных форм углерода при 25 и 300°C, согласно которым термодинамически стабильной формой углерода в I контуре транспортной ЯЭУ на остановленном реакторе является метан, на работающем — карбонат-ион. Таким образом, выход в теплоноситель ацетат-ионов и сложных углеводов в первоначальные периоды работы реактора на мощности, а также постепенное снижение их концентрации можно объяснить кинетически замедленным переходом углерода в

термодинамически более выгодную форму существования вследствие разрушения органических соединений.

Низкая концентрация в теплоносителе, как и доля нитрат- и нитрит-ионов в общем содержании азота, объясняется высоким восстановительным потенциалом теплоносителя при аммиачном водно-химическом режиме. В работе [17] представлена диаграмма Пурбе для системы NH_4OH-H_2O при 300°C. На диаграмме видно, что окисление аммиака даже до нитрит-иона в I контуре транспортной ЯЭУ термодинамически не выгодно. В результате равновесие в реакции образования нитрит- и нитрат-ионов сдвинуто практически полностью в сторону исходных продуктов — азота или аммиака.

Концентрации сульфат- и хлорид-ионов в теплоносителе I контура на работающей ЯЭУ находились на стабильно низком уровне. В переходных режимах работы реактора (при останове) концентрации анионов, в частности сульфатов и хлоридов, повышаются. Это явление, вероятно, связано с возвратом в теплоноситель солей при эффекте хайд-аут. Также следует указать на наличие отдельных залповых поступлений в теплоноситель сульфатов при подключении фильтров на остановленном реакторе, что объясняется эффектом восстановления ионообменного равновесия между фазами ионита и теплоносителя.

Подводя краткий итог вышесказанному, можно отметить стабильно низкое содержание коррозионно-агрессивных примесей (хлорид- и сульфат-ионов) в теплоносителе работающей транспортной ЯЭУ с аммиачным ВХР. Для органических кислот и азотсодержащих анионов данный факт объясняется их термодинамической нестабильностью в теплоносителе работа-

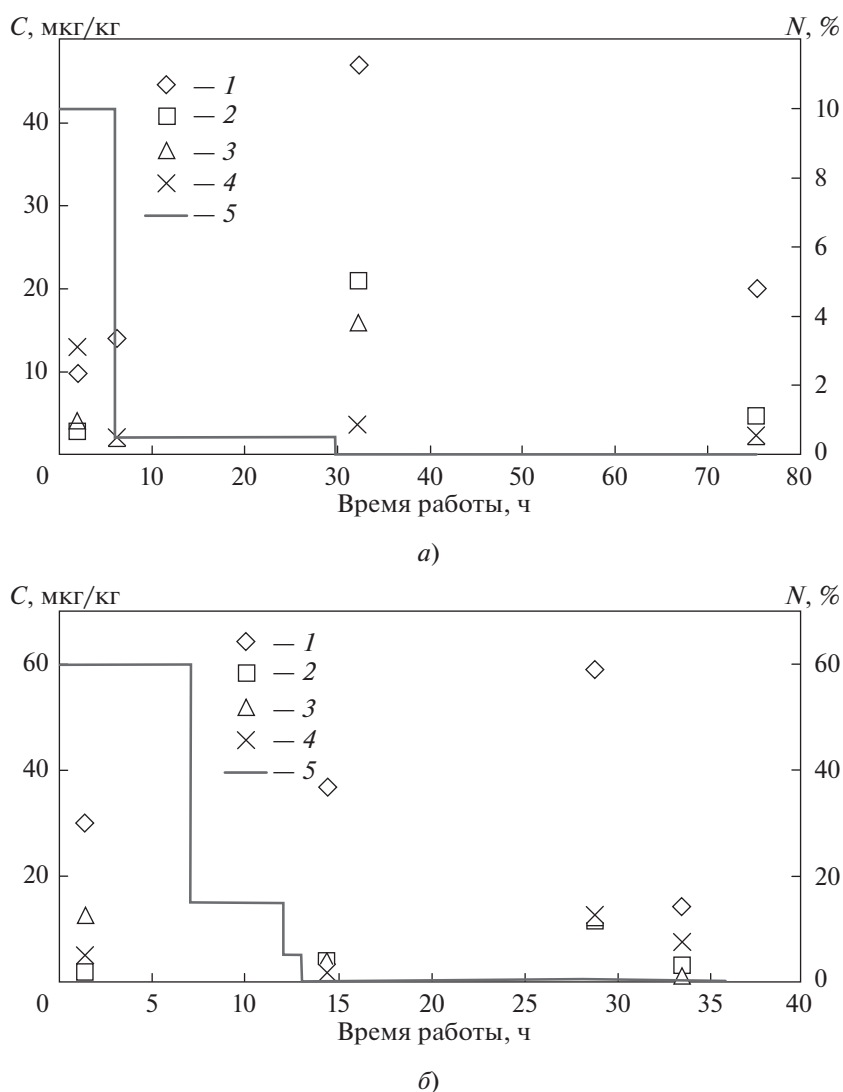


Рис. 6. Концентрация анионов C в теплоносителе I контура при останове реактора после первого (а) и седьмого (б) периодов эксплуатации.

1 – ацетат-ионы; 2 – хлорид-ионы; 3 – нитрат-ионы; 4 – сульфат-ионы; 5 – мощность реактора

ющего реактора, для сульфат- и хлорид-ионов – отсутствием источников поступления, кроме ионообменных фильтров. Невысокое содержание анионных коррозионно-агрессивных примесей подтверждает применимость аммиачного ВХР для теплоносителя I контура атомных электростанций малой мощности в условиях долговременной работы в автономном режиме без использования ионообменных фильтров. Низкий уровень содержания активаторов коррозии также обуславливает небольшой выход в теплоноситель и продуктов коррозии конструкционных материалов. По данным атомно-эмиссионной спектроскопии теплоносителя, содержание железа (основного продукта коррозии) в периоды работы на мощности составляло 2–5 мкг/дм³ и в

среднем, вследствие кратковременного роста в переходные режимы, не превышало 45 мкг/дм³ [18].

В то же время на остановленном реакторе возможен рост концентрации анионов в теплоносителе. В связи с этим содержание в теплоносителе сульфат- и хлорид-ионов, способствующих возникновению локальной коррозии конструкционных материалов на остановленном реакторе, необходимо нормировать и поддерживать на минимально заданном уровне. Особое внимание, по мнению авторов, следует уделять контролю за этими показателями при расхолаживании для определения максимальной концентрации анионов в теплоносителе, а также перед пуском реактора для прогнозирования последствий подключения системы очистки в период планово-предупредительных работ.

ВЫВОДЫ

1. Начальный этап запуска и выхода на энергетические уровни мощности транспортной ЯЭУ сопровождался высокой концентрацией в теплоносителе I контура ацетат-ионов (примерно 220 мкг/кг), которая при работе реактора снижалась до 25–40 мкг/кг вследствие перехода углерода в более термодинамически стабильные формы.

2. Формирование азотсодержащих анионов в I контуре транспортной ЯЭУ не выгодно из-за высокого восстановительного потенциала теплоносителя. В результате доля нитрит- и нитрат-ионов в общем содержании азота не превышала $2.1 \times 10^{-4}\%$, а их концентрация в теплоносителе — 15 мкг/кг.

3. Концентрации хлорид- и сульфат-ионов в теплоносителе I контура на остановленном реакторе или при его работе на стационарном уровне мощности в течение всего рассматриваемого периода эксплуатации составляли 5–10 и 2–3 мкг/кг соответственно. В то же время при останове и расхолаживании реактора наблюдался рост концентрации этих анионов в 2–3 раза. Также были обнаружены отдельные залповые поступления сульфат-ионов при подключении ионообменных фильтров на остановленном реакторе.

4. На основании полученных данных для совершенствования аммиачного ВХР теплоносителя I контура АСММ при работе на энергетических уровнях мощности рекомендуется отказаться от использования ионообменных фильтров очистки.

5. Предлагается включить в нормируемые показатели качества теплоносителя I контура АСММ концентрации хлорид- и сульфат-ионов для остановленного реактора равные 50 мкг/кг, в качестве диагностических показателей при расхолаживании — концентрации хлорид- и сульфат-ионов 100 и 200 мкг/кг соответственно. Такой подход позволит предотвращать избыточное (существенно большее экспериментально установленное содержание) поступление в теплоноситель коррозионно-активных примесей при заполнении реактора и проводить оценку процессов, при которых повышается их выход в периоды эксплуатации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность и признательность коллегам отдела химико-технологических исследований Е.Ю. Харитоновой, Е.Е. Щербакову, А.А. Амосову, А.А. Петухову, А.В. Жижину, Д.Н. Трофимову, принимавшим непосредственное участие в решении методических вопросов, получении экспериментальных данных и оформлении материалов статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Rodríguez M.A.** Corrosion control of nuclear steam generator under normal operation and plant-out age conditions: areview // *Corros. Rev.* 2020. V. 38. P. 195–230. <https://doi.org/10.1515/corrrev-2020-0015>
2. **Precursor** devolution and stress corrosion cracking initiation of cold-worked alloy 690 in simulated pressurized water reactor primary water / Z. Zhai, M. Toloczko, K. Kruska, S. Bruemmer // *Corrosion*. 2017. V. 73. Is. 10. P. 1224–1236.
3. **Stress** corrosion cracking of 316SS and INCOLOY-800 in high temperature aqueous containing sulfate and chloride / Z. Weiguo, L. Fangliang, C. Fengqin, Z. Hongyi, C. Xiaoning // *Proc. of the 5th Intern. Symp. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors*. Monterey, California, USA, 25–29 Aug. 1991. P. 240–244.
4. **Corrosion** of steam generator tube material: Effects of chloride and sulphate ions / M. Bojinov, P. Kinnunen, T. Laitinen, K. Mäkelä, T. Saario, P. Sirkiä, K. Yliniemi // *Plant Life Management. Progress for Structural Integrity: VTT Symposium*. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland. 2003. P. 153–164.
5. **Optimization** of water chemistry to ensure reliable water reactor fuel performance at high burnup and in ageing plant (FUWAC). IAEA, Vienna, 2011. IAEA-TECDOC-1666.
6. **Hydration** effect on ion exchange resin irradiated by swift heavy ions and gamma rays / I. Boughattas, V. Labed, A. Gerenton, Y. Ngono-Ravache, A. Dannoux-Papin // *J. Nucl. Mater.* 2018. V. 504. P. 68–78.
7. **Oxidative** decomposition properties of cationic exchange resins producing SO_4^{2-} in power plants / Z. Zhu, C. Dai, S. Liu, Y. Tian // *Water Sci. Technol.* 2015. V. 71. P. 1478–1484. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.109>
8. **Ходырев Б.Н., Кричевцов А.А., Соколюк А.А.** Исследование процессов окисления органических веществ в теплоносителе ТЭС и АЭС // *Теплоэнергетика*. 2010. № 7. С. 11–16.
9. **Отраслевой стандарт 95 10002-95.** Нормы качества воды первого и третьего контуров реакторной установки судов департамента морского транспорта Российской Федерации с водо-водяными реакторами типа КЛТ-40. М.: РНЦ “Курчатовский институт”, 1995.
10. **Zmitko M.** Characteristics of corrosion products in the loop and VVER plant primary systems. PaloAlto, CA, EPRI, 1999. TP-114132.
11. **Гордеев А.В., Ершов Б.Г.** Расчет pH водного теплоносителя в первом контуре ВВЭР // *Атомная энергия*. 1995. Т. 79. Вып. 5. С. 360–366.
12. **Macdonald M.U., Pitt J., Macdonald D.** The impact of radiolytic yield on the calculated ECP in PWR primary coolant circuits // *J. Nucl. Mater.* 2007. V. 362. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2006.10.012>
13. **The importance** of ECP in predicting radiation fields in PWR and VVER primary circuits / M. Urquidi-Macdonald, S.L. Jacesko, D.D. Macdonald, M. Salter-Williams // *Power Plant Chem.* 2002. V. 4. P. 384–390.

14. **Grezzo O., Mraz V.** Resin Intrusion into primary circuit of Jaslovske BohuniceV-1 // Proc. of the 15th Atomic Energy Research Symposium on WWER Reactor Physics and Reactor Safety. Znojmo, Czech Republic, 3–7 Oct. 2005. P. 297–304.
15. **Гурский В.С., Харитонов Е.Ю., Цапко Ю.В.** Ионообменные смолы как источник примесных органических соединений // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. 2017. № 3 (9). С. 44–49.
16. **Lysakova K., Neumann J., Vonkova K.** Evaluation of carbon-14 life cycle in reactors WWER-1000 // Proc. of the Nuclear Plant Chemistry Conf. Paris, France, 24–27 Sept. 2012.
17. **Fundamental** mechanisms of component degradation by corrosion in nuclear power plants of Russian design / G. Saji, V.A. Yurmanov, V.I. Baranenko, V.A. Fedorova, G. Karzov, B.T. Timofeev // Proc. of the 16th Intern. Conf. on Nuclear Engineering ICONE 16 ASME. Orlando, Florida, USA, 11–15 May 2008.
18. **Поведение** продуктов коррозии в первом контуре ЯЭУ с водным теплоносителем / Б.А. Гусев, В.Г. Семенов, А.А. Ефимов, В.В. Панчук // Вестник СПбГУ. 2012. Сер. 4. Вып. 4. С. 110–118.

Optimized Monitoring of Ammonia Water Chemistry in the Primary Coolant Circuit of Small Capacity Light Water Reactors

A. I. Gorshkov^a, A. A. Zmitrodan^a, S. N. Orlov^{a, b}, and Yu. V. Tsapko^{a, b, *}

^a *Aleksandrov Research Institute of Technology, Sosnovyi Bor, Leningrad oblast, 188540 Russia*

^b *Peter the Great St Petersburg Polytechnic University, St Petersburg, 194214 Russia*

^{*}*e-mail: yura2823@mail.ru*

Abstract—The article presents the results obtained from a study of the processes occurring in the primary circuit coolant of a KLT-40S propulsion light water reactor in conducting the ammonia water chemistry (WC) in it. At the fuel residence cycle initial stage, a high concentration of acetate ions (200–220 ppb) was noted in the coolant, and their content turned to be prevailing among other anion impurities. In the course of reactor operation, their concentration in the coolant decreased as a consequence of radiolysis and thermal oxidation processes. Other anions, including those that cause local corrosion of structural materials (chloride and sulfate ions) were present in the coolant of both the operating and shutdown reactor in low quantities: not more than 15 ppb. The results obtained from the study of the behavior of anion impurities in the primary circuit coolant point to the possibility of long-term operation of the nuclear power facility (NPF) without the need to connect ion exchange purification filters, the operation of which in normal operation modes can cause contamination of process media with the products of their own destruction. Proceeding from the experience gained from operation of propulsion light water reactors, ways for improving the primary coolant circuit water chemistry (WC) for small capacity nuclear power plants (SNPPs) are proposed; in particular, it is recommended to maintain the standardized concentrations of reference anions in the coolant of the shutdown reactor and also to maintain the coolant parameters at the diagnostic level in the course of cooling down the reactor. It is proposed to adopt, as the standardized indicators of the SNPP primary circuit coolant, the concentrations of chloride and sulfate ions for the shutdown reactor equal to 50 ppb and adopt, as diagnostic indicators in cooling down the reactor, the concentrations of chloride and sulfate ions equal to 100 and 200 ppb, respectively.

Keywords: propulsion nuclear power facility, ammonia water chemistry, WC improvement, ion exchange filters, study of water coolant